

鋼床版閉断面縦リブ現場溶接継手の疲労強度

FATIGUE STRENGTH OF FIELD-WELDED TROUGH RIB
JOINTS OF ORTHOTROPIC STEEL DECKS

近藤明雅*・山田健太郎**・青木尚夫***・菊池洋一****

By Akimasa KONDO, Kentaro YAMADA, Hisao AOKI
and Yoichi KIKUCHI

1. ま え が き

鋼床版は、直接通過交通による荷重を支えることから道路橋の部材のうちでも、疲労被害を受けやすい部材の1つである。本研究は、逆台形閉断面縦リブ（以後トラフリブと略す）の現場突合せ溶接継手の疲労強度を実験的に検討したものである。実験には、トラフリブの現場溶接と同様の方法で溶接された引張試験片と、実物大トラフリブを用いた曲げ試験体を使用した。

鋼床版の縦リブとしてトラフリブが、曲げおよびねじり剛性が大きいこと、溶接量を減らすことができることから使用される機会が増えている。その現場継手は、トラフリブの内部を気密にすることができること、継手形状を単純にできることから、Fig. 1 に示すように裏当金を用いた突合せ溶接施工の採用が多くなりつつある。ところが、この継手形式は、次のような理由から疲労に対して弱点になりやすい。

① トラフリブの現場溶接継手は、一般に上向きあるいは立向きの溶接姿勢となり、下向き溶接に比べてルート部の溶込み状態が悪くなる可能性がある。縦桁や腹板の近傍では、狭い場所での溶接となり作業性が悪いいため欠陥が生ずる可能性がある。

② 施工誤差によって生ずる縦リブの目違いを是正することは難しく、多少の目違いを許容する必要がある。

③ 裏当金の適合性が悪く、肌すきが生じる。

④ 現場溶接時に、裏当金や開先が発錆していることが考えられる。

⑤ 鋼床版には、剛な主桁縦桁があり、トラフ

リブが連続してつらなっているため現場溶接時の変形拘束が大きく、その結果継手部に引張残留応力が生じていることが考えられる。

以上の問題点のほかに、溶接工の技量、気象、現場環境など不利な条件が付加される。これらの理由から、鋼床版トラフリブの現場溶接継手部の基本的な疲労強度を調査し、その対策を考慮しておく必要がある。

鋼床版の疲労強度に対する研究は、Klöppel¹⁾、Hänsch²⁾、Kunert³⁾は、縦リブと横リブの交差部に着目して疲れ試験を行った。アメリカでは、Erzurumlu⁴⁾が、逆台形の閉断面縦リブとデッキプレートの溶接継手形式および縦リブ自体の溶接継手形式の検討を行った。

国内では、国広らが鋼床版に使用される3種類の溶接継手を想定し、リブ十字隅肉溶接継手、前面隅肉溶接継手および連続縦隅肉溶接継手について、引張疲れ試験を行った。さらにこの試験結果と各地で行われた交通荷重の実態調査による通行荷重の頻度分布をもとにして、設計照査する方法を提案している^{5)~7)}。前田らは、主桁と横桁とに囲まれた1パネルの鋼床版構造に関する実験的研究を行っている¹²⁾。小西らは、デッキプレートの現場突合せ溶接継手に関する引張・曲げ疲れ試験を行い、表面

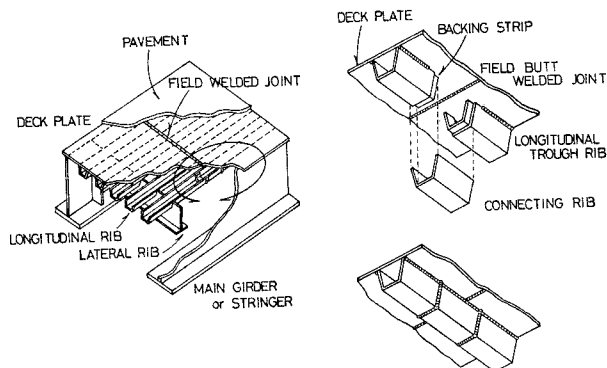


Fig. 1 Welding procedure of field-welded trough rib joint.

* 正会員 名城大学講師 理工学部土木工学科

** 正会員 Ph. D. 名古屋大学助教授
工学部土木工学科

*** 正会員 トビー工業技術研究所

**** 正会員 名古屋大学教授 工学部土木工学科

余盛削除の効果、裏当金削除の効果、肌すきの影響を検討している⁹⁾。佐伯らは、トラフリブの現場突合せ溶接の施工条件と継手品質の関係および突合せ溶接されたトラフリブから切り出した引張疲れ試験片による疲労寿命と溶接欠陥の関係を検討した⁹⁾。トラフリブ現場溶接継手の曲げ疲労に関する研究は、本研究のほか、堀川ら¹⁰⁾、西脇ら¹¹⁾、佐伯ら¹⁶⁾が行っている。西脇らは、放射線透過試験による溶接等級が1等級と4等級の内部欠陥を有する2体の曲げ試験体を用いて疲れ試験を行った。疲れ亀裂は、2体ともトラフリブ隅角部の溶接ルート部の切欠きから生じたと報告している。堀川らは、溶接欠陥の度合と疲労強度の関係を把握するため、目違いおよび開先部の表面処理条件を変化させた試験体について実験を行った。表面処理を施すことにより発生する溶接欠陥が疲労寿命に及ぼす影響は小さく、目違いが大きい場合には疲労寿命が小さいと報告している。佐伯らは、トラフリブ現場溶接継手の疲労に対する許容応力度を設定するための疲れ試験データを得る目的で、約60体の試験体による疲れ試験を行った。トラフリブで現場溶接継手の疲労強度は、止端部の仕上げをしないリブ十字隅肉溶接継手の疲労強度をやや上回る程度の数値となると報告している。しかし、これらの研究では、突合せ溶接部のルート間隔が十分に確保された場合について疲れ試験が行われており、ルート間隔が不十分な場合の疲労強度にはふれられていない。

本研究では、前記の裏当金を用いた現場突合せ溶接継手の疲労強度低下要因を有する引張疲れ試験を行った。次に、この試験結果に基づき、目違いとルート間隔との条件に着目し、実物大トラフリブ曲げ疲れ試験を実施した。実物大トラフリブにおいては試験体製作時の溶接順序を変え、トラフリブ底部の溶接残留応力分布を変化させた試験体についても曲げ疲れ試験を行い、溶接残留応力の影響を検討した。

2. 裏当金を用いた突合せ溶接継手の引張疲れ試験

(1) 試験体および試験方法

裏当金を用いた突合せ溶接継手の引張疲れ試験体の形状・寸法を Fig. 2 に示す。すべての試験体のルート間隔を 5 mm、開先角度を 45° とし、低水素系溶接棒 (JIS D 5026, $\phi 3.2$ mm) を用いて手溶接で行った。溶接の積層は 2 層で溶接電流の中心値は 110 A であった。試験体の使用鋼材は SS 41 とした。試験体 A および B は、現場突合せ溶接と同様な方法で接合されたトラフリブの側面および底面から切り出したものである。試験体 C は、

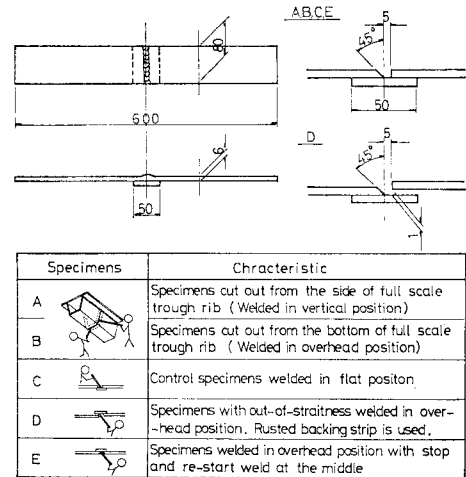


Fig. 2 Tensile fatigue specimens simulating a part of field-welded trough rib joint.

下向き姿勢で2枚の平板が突合せ溶接された。試験体Dは、発錆した裏当金を用い、1 mm の目違いによる肌すきを設けて接合されたものであり、試験体Eはその中央部に溶接棒継ぎが設けられ、ともに上向き溶接された。

疲れ試験に先立ち、溶接による曲がり変形を試験体の長さの 1/1 000 以下に矯正したが、溶接ビード余盛は未仕上げとし、裏当金はつけたままとした。曲がり変形の測定は、Fig. 16 に示すように2個のダイヤルゲージによって行った。目違いのない試験体 A, B, C, E では、試験体の表裏2回測定し、その差の半分が曲がり量となる。目違いのある試験体Dでは、2回の測定値の差を求め、右と左の値の差の半分が曲がり量となる。

疲れ試験は、応力比 (最小応力と最大応力の比) $R = 0.35$ 、繰返し速度 540 cpm で実施した。

(2) 疲れ試験結果

疲れ試験が行われた作用応力範囲と繰返し回数および疲れ亀裂発生位置を Table 1 に示す。>印を付したデータは、未破断を表わす。未破断データに疲れ亀裂発生位置が記入されているが、これは引き続き応力振幅を大きくして疲れ試験を行ったときの結果である。疲れ亀裂は、試験体 A, B および D において、突合せ溶接のルート部に多く発生しており、一方試験体 C, E においては、突合せ溶接止端部に多く発生している。試験体 E は、上向き溶接にかかわらず、溶接溶込みが良好で、溶接棒継ぎ部の止端部に疲れ亀裂が発生した。この疲れ亀裂発生位置の特徴は、現場突合せ溶接に近い条件においては、良好なルート部溶込み状況が得られにくいことを示している。Fig. 3 に、 $S-N_f$ 線図を示す。各タイプの試験体の結果に大きなばらつきがみられるが、試験体Dの疲労強度が最も低い。試験体Dの 50% 破壊確率線が破線で

Table 1 Summary of fatigue test result of tensile test specimens.

Specimens	Stress Range σ_r (MPa)	Maximum Stress σ_{max} (MPa)	Fatigue Life N_f ($\times 10^6$)	Crack Initiation Point
A	196	302	0.094	R
	157	242	0.937	R
	157	242	2.17	R & T
	157	242	0.856	R
	127	195	1.86	R
	127	195	>3.16	(R)
	78	120	>3.05	(T)
B	196	302	0.095	R
	157	242	0.839	T
	157	242	1.08	R
	127	195	>3.09	(R)
	127	195	1.75	R
	127	195	1.18	R
	98	151	>3.10	(T)
78	120	>3.50	(R)	
C	196	302	0.650	T
	196	302	0.300	R
	196	302	0.278	T
	157	242	0.910	T
	157	242	0.754	T
	157	242	0.800	T
	157	242	0.445	T
	127	195	>3.08	(T)
	127	195	>4.68	—
	127	195	1.69	T
	127	195	2.30	T
98	151	>4.12	(T)	
D	196	302	0.102	T
	196	302	0.084	R
	196	302	0.084	R
	151	199	0.131	T
	127	195	0.375	R
	127	195	0.838	T
	78	120	>4.82	(R)
	78	120	>3.33	(R)
E	196	302	0.215	T
	196	302	0.154	T
	196	302	0.306	T
	157	242	0.486	T
	127	195	>3.85	(T)
	127	195	>3.02	(T)
	127	195	>3.72	(T)
	78	120	2.77	T
78	120	>3.72	(T)	

T : Weld Toe, R : Weld Root.

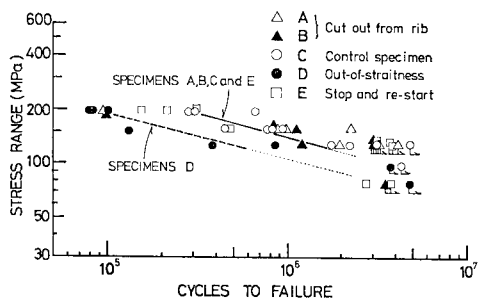
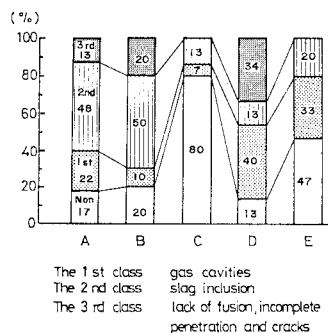


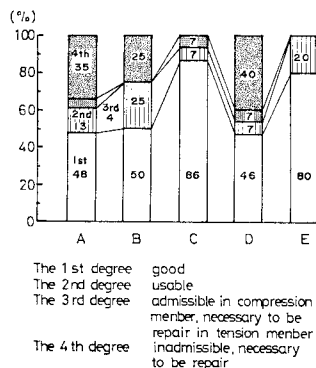
Fig. 3 Fatigue test results of tesile specimens.

示され、外挿によりその 200 万回疲労強度を推定すると約 90 MPa である。これに対して、試験体 A, B, C および E の 200 万回疲労強度は約 115 MPa である。

溶接継手の内部欠陥と疲労強度との関係を考察するため、疲労試験に先立ち引張疲労試験体の放射線透過試験を行った。試験は、JIS Z 3104-1968「鋼溶接部の放射線透過試験方法および透過写真の等級分類方法」に従って実施した。その結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 (a) は、溶接欠陥の種類によって分類したものであり、Non は内部欠陥が認められないことを示す。内部欠陥は溶接姿勢によって影響を受け、下向き溶接を行った試験体 C では、80% が無欠陥であるのに対し、目違いに伴う肌すきを設けて発錆した裏当て金を用い上向き溶接を行った試験体 D では、87% が欠陥を有している。実物大トラフリブから切り出した試験体 A, B では、それぞれ 83%, 80% が欠陥を有している。試験体 D, E を比較すると、試験体 D に欠陥が多くみられる。これは、水をかけて 1 週間程度外に放置した裏当て金を使用したことによるとと思われる。Fig. 4 (b) は、内部欠陥の種類、大きさおよびその数量によって、道路橋示方書¹⁴⁾によって等級分類した結果で、第 3, 4 等級は何らかの補修が必要とされる。試験体 D の約半数に、溶接継手として不



(a) A kind of weld defects observed by the X-ray radiography.



(b) Classification of the severeness of the weld defects for each type of specimens.

Fig. 4

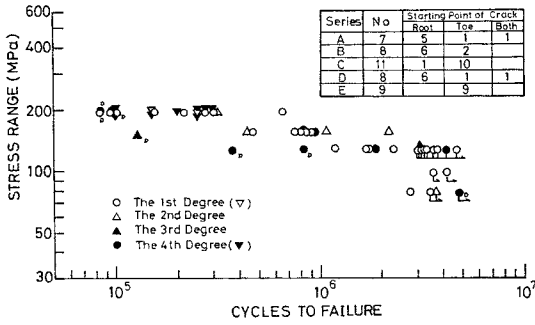


Fig. 5 Summary of tensile fatigue test results according to the severeness of the weld defect.

合格な欠陥がみられる。

疲れ試験結果を、Fig. 4 (b) の等級分類によって整理すると Fig. 5 になる。目違いに伴う肌すきを有する試験体 D については、添字 D を付して表わした。また、疲れ亀裂発生位置で分類した試験体数を図中の表に示した。試験体 D においては、疲労強度低下原因として、内部欠陥以外に目違いによって生ずる偏心曲げモーメントおよび目違いに伴う肌すきによってルート部に生ずる鋭い切欠きが考えられる。このため、試験体 D の結果を除いて考えると溶接継手として不合格な第 3, 4 等級の疲労強度が、第 1, 2 等級の試験体に比べて劣っているとはいいがたく、内部欠陥が疲労強度に及ぼす影響は小さい。これは、疲れ亀裂がおもに溶接止端部およびルート部から発生していることから類推することができる。図中 ▽, ▼ 印は、建設省土木研究所において実施された試験結果を示す⁹⁾。この研究では、溶接工の技量、溶接開先の形状と寸法および作業空間を変化させ、溶接欠陥との関連性を検討したのち、引張疲れ試験体を切り出し 22 体が試験された。このうち、ルート間隔が 5 mm, 45° の片側開先の結果を図示した。疲労強度に及ぼす溶接内部欠陥の影響は小さく、本研究の結果と一致する。

3. 実物大トラフリブ現場溶接継手部の残留応力分布の測定と曲げ疲れ試験

(1) 試験体および試験方法

曲げ疲れ試験体の形状と寸法を Fig. 6 に示す。試験体の材質は SS 41 であり、トラフリブは板厚 6 mm の鋼板をプレス加工した。トラフリブの曲げ加工半径は、試験体 H では 90 mm (板厚 t の 15 倍) とし、他の試験体では 30 mm (板厚 t の 5 倍) とした。Fig. 7 にトラフリブ突合せ溶接部の詳細を示す。試験体 F, G' は十分なルート間隔をもち、目違いによる肌すきを有してい

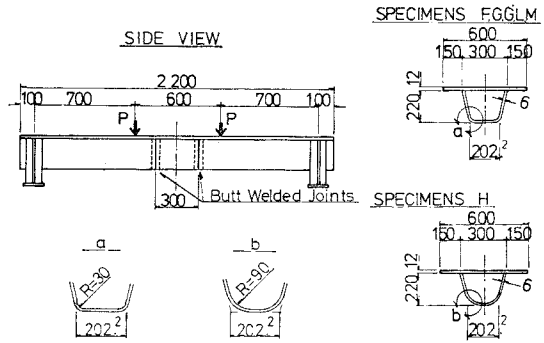


Fig. 6 Bending fatigue specimens of decks with trapezoidal trough ribs.

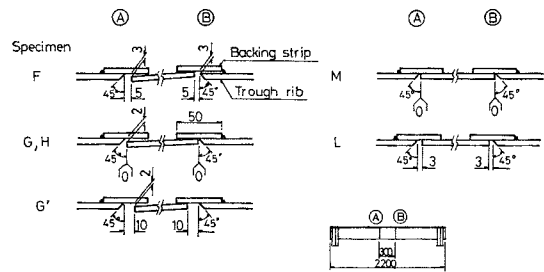


Fig. 7 Details of butt-weld joints.

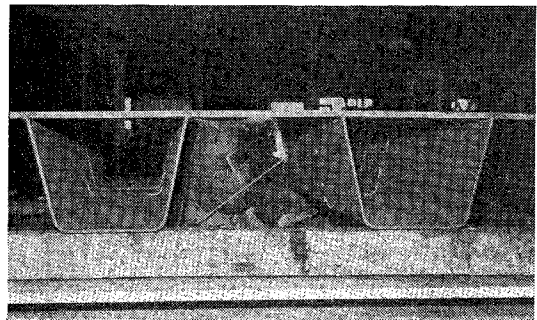


Photo 1 Welding of trough rib joints.

る。試験体 G, H はルート間隔が 0 mm で、A 部に 2 mm の目違いによる肌すきを設けた。試験体 L, M は、目違いによる肌すきがなくルート間隔はそれぞれ 3 mm, 0 mm とした。溶接には、エンジンウェルダを用い、低水素系溶接棒 (JIS D 5026, ϕ 3.2 mm) を使用した。溶接電流は、80~110 A であった。また、現場溶接を想定して上向きおよび立向き溶接を行った (Photo 1 参照)。試験体 F, G, G' および H は、トラフリブの底面から溶接を始め、以下側面第 1 層、底面第 2 層、側面第 2 層の順序で溶接した。試験体 L, M は、上記試験体 F, G, G' と溶接順序を変え、すなわち側面第 1 層、底面第 1 層、側面第 2 層、底面第 2 層の順序で行い、トラフリブ底面に圧縮残留応力が生じないようにした。

曲げ疲れ試験は、トラフリブ底面の応力に着目し、応

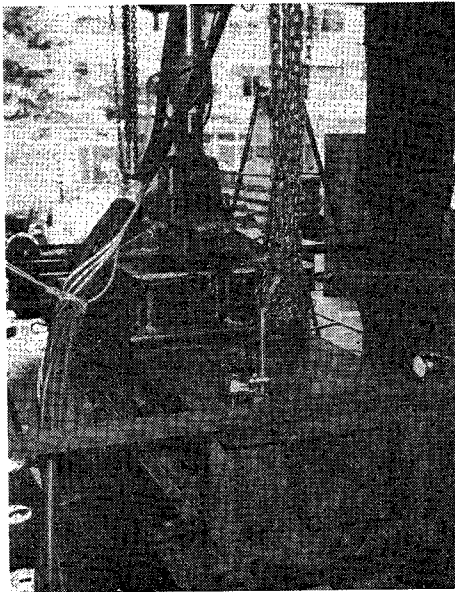


Photo 2 Test set-up for bending fatigue test.

力比 $R=0.1\sim 0.18$, 繰返し速度 $60\sim 240$ cpm で実施した。試験体の支間は 2 m とし, 2点曲げ荷重を行い, 等曲げモーメント区間に, トラフリブ突合せ溶接部を配置した。疲れ試験状況を Photo 2 に示す。

(2) 溶接残留応力の測定

溶接残留応力の測定は, トラフリブ底面から突合せ溶接を始めた試験体 (F, G) と, トラフリブ側面から始めた試験体 (L, M) について, 突合せ溶接部 (A 部, B 部とも) で行った。突合せ溶接ビードの両側 (ゲージ長 40 mm) にコンタクトボールを打ち込み, フェンダー型コンタクトゲージを用いて, 断面分割法によりトラフリブ方向の溶接残留応力を測定した。測定点の位置と鋼板の分割位置を Fig. 8 に示す。トラフリブ底面から溶接を始めた場合の残留応力分布を Fig. 9 に示す。トラフリブ部分は展開して示した。図中実線の値は A 部での測定値を示し, 破線の値は B 部での測定値を示す。トラフリブ底部の測定値には, 大きなばらつきがみられるが, A 部 B 部の平均値をとると, 約 100 MPa の圧縮残留応

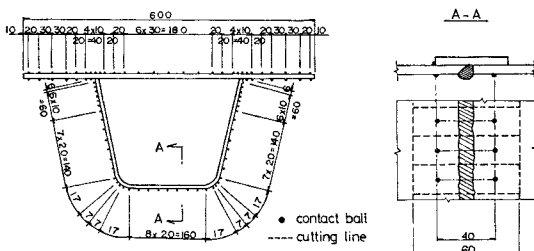


Fig. 8 Measurement of residual stress distributions.

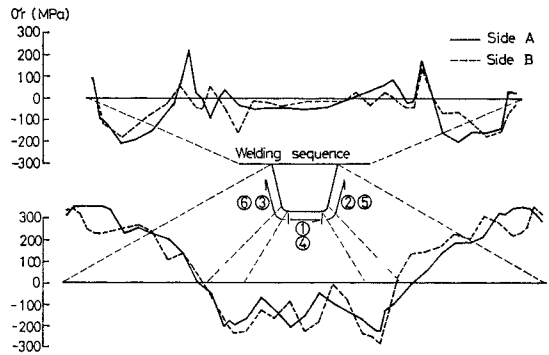


Fig. 9 Residual stress distribution of specimen G welding was first placed at the bottom.

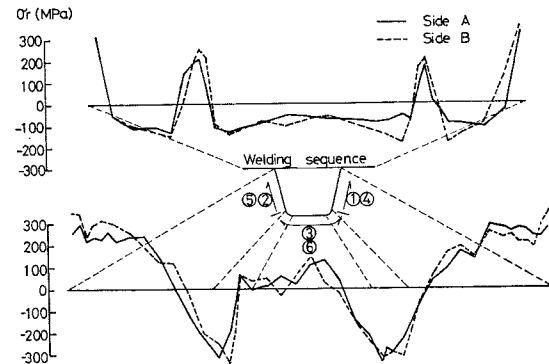


Fig. 10 Residual stress distribution of specimen L and M welding was first placed at the side.

力が生じている。曲げ加工部では 200 もしくは 250 MPa の圧縮残留応力が分布している。Fig. 10 は, トラフリブ側面から溶接を始めた試験体の残留応力分布である。底面には, 約 50 MPa の引張残留応力が生じており, 曲げ加工部には, 300 MPa 程度の圧縮残留応力が生じている。このように, 溶接順序の違いによりトラフリブ底面の残留応力分布が大きく変化することがわかる。

(3) 疲れ試験結果と考察

トラフリブ底面の作用応力範囲 σ_r , 破断繰返し回数 N_f , トラフリブの下面に現われた疲れ亀裂を目視により発見したときの繰返し回数 N_c^* , 疲れ亀裂発生位置とその位置での欠陥の大きさを Table 2 に示す。> 印を付したデータは未破断を表わし, A および B は疲れ亀裂発生位置が, Fig. 7 に示す A 部もしくは B 部であることを示す。トラフリブの曲げ加工半径が 30 mm で, ルート間隔が 0 mm の試験体 G, M においては, 疲れ亀裂はトラフリブ底面ルート部の不溶着部から発生し進展している。破面観察によると, $1.6\sim 2.8\text{ mm}$ の深さの不溶着部がみられる。ルート間隔が 0 mm で曲げ加工

Table 2 Summary of bending fatigue test result of full scale trough rib joints.

Specimens		Stress Range σ_r (MPa)	Maximum Stress σ_{max} (MPa)	Fatigue Life N_c^* ($\times 10^6$)	Fatigue Life N_f ($\times 10^6$)	N_c^*/N_f	Crack Initiation Point
F	1	147	163	—	1.78	—	Toe of tack weld
	2	176	196	—	0.807	—	A, Bottom, R
G	3	147	163	0.028	0.032	0.88	B, Bottom, IP [2.1-2.8]
	4	78	87	0.500	1.87	0.27	B, Bottom, IP [1.8]
	5	59	66	3.45	>5.00	—	B, Bottom, R
	6	107	124	0.155	0.309	0.50	B, Bottom, IP [1.8-2.2]
	7	107	124	0.133	0.298	0.45	B, Bottom, IP [1.8-2.8]
	8	85	104	1.03	1.94	0.53	A, Web, IP [2.8]
	9	78	87	2.00	2.57	0.78	B, Bottom, IP [1.8-2.4]
G'	10	147	163	3.06	3.15	0.97	A, Curve, R
H	11	142	167	0.390	0.419	0.93	A, Curve, R
	12	125	139	0.888	1.00	0.89	A, Curve, R
	13	113	131	—	2.46	—	B, Curve, R
	14	142	167	0.341	0.353	0.97	B, Curve, IP [0.8-1.3]
	15	104	116	3.00	3.18	0.94	B, Curve, R
	16	83	92	—	>4.00	—	—
	17	104	116	1.12	1.25	0.90	B, Curve, R
L	18	129	143	0.975 (67)	1.01	0.96	A, Bottom, R
	19	105	117	1.46 (142)	1.49	0.98	A, Bottom, T
	20	167	186	0.149 (72)	0.186	0.80	A, Bottom, LF
	21	82	91	3.05 (39)	3.62	0.84	B, Bottom, R
	22	111	123	1.35 (19)	1.95	0.69	A, Bottom, SI
M	23	52	58	1.20 (215)	>5.47	—	B, Bottom, IP [2.0-2.4]
	24	70	78	0.450 (46)	0.504	0.89	B, Bottom, IP [1.6-2.2]
	25	70	78	0.499 (20)	2.97	0.17	A, Bottom, IP [1.6]
	26	61	68	1.21 (27)	>3.20	—	A, Bottom, IP [1.6-2.2]

A : Side A, B : Side B, Bottom : Bottom flange of trough rib, Web : Web of trough rib, Curve : Curved part of trough rib, T : Weld toe, R : Weld root, IP : Incomplete penetration, LF : Lack of fusion, SI : Slag inclusion, () : Crack length at surface, [] : Depth of incomplete penetration by millimeter.

半径が 90 mm の試験体Hでは、曲げ加工部のルートから疲れ亀裂が発生した。そのうち4体は、目違いのないB部ルート部の不溶着部に疲れ亀裂が生じた。この不溶着部の深さは、0.8~1.3 mm であり、試験体 G, M に比べて小さい。2体は、2 mm の目違いによる肌すきを設けたA部で破断した。破断面には、不溶着部はみられず、疲れ亀裂は肌すきによるルート部の鋭い切欠きに生じたと思われる。ルート間隔が、3, 5, 10 mm の試験体 L, F, G' 合計8体の破断面には不溶着部はみられなかった。その内訳は、試験体Fのうち1体が裏当金の仮付け溶接の止端部から、試験体Lの1体が突合せ溶接の止端部から疲れ亀裂が生じ、それ以外の6体の疲れ亀裂はルート部から発生した。疲れ破面観察の一例を Fig. 11 に示す。図中 a, b, c を記した線はビーチマークで、それぞれ 120 万, 140 万, 160 万回時のものである。また、A ↔ A, A ↔ B... は、トラフリブの下面に現われた疲れ亀裂の先端を目視によりマークした位置で、そのときの繰返し回数を付した。斜線部は不溶着部を示し、疲れ亀裂は図中 ⑦ 付近の不溶着部に発生したと思われる。

Fig. 12 に S-N_f 線図を示す。実線は各タイプの試験体の 50% 破壊確率線を示す。ルート間隔が十分あ

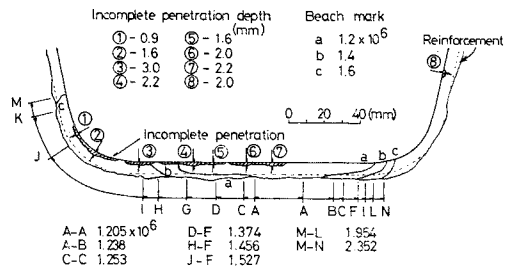


Fig. 11 Sketch of fatigue fracture surface (side A of No. 26 specimen).

り、トラフリブ底面に圧縮残留応力が生じている試験体 F, G' の疲労強度が最も高く、200 万回疲労強度は 151 MPa である。リブ底面に引張残留応力と不溶着部が存在する試験体 M の疲労強度は最も低い。トラフリブの曲げ加工半径が 90 mm で、ルート間隔が 0 mm の試験体Hの S-N_f 線は、試験体Gと試験体 F, G' の中間に位置している。これは、前述のように試験体Gが、トラフリブ底面に大きな不溶着部を有しているのに対し、試験体Hでは、不溶着部がないかもしくは不溶着部が小さいためと考えられる。

トラフリブの突合せ溶接継手の疲れ試験は、大阪大学¹⁾および土木研究所¹⁶⁾においても行われており、結果

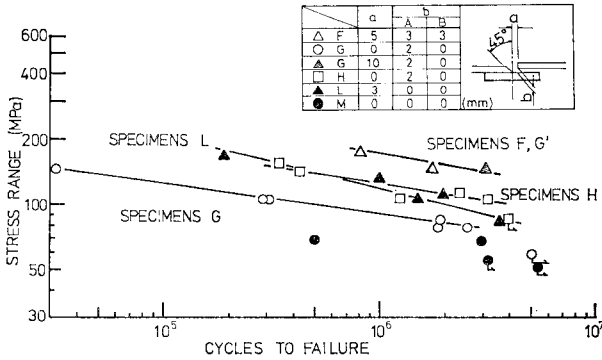


Fig. 12 Bending fatigue test result of full scale trough rib joints.

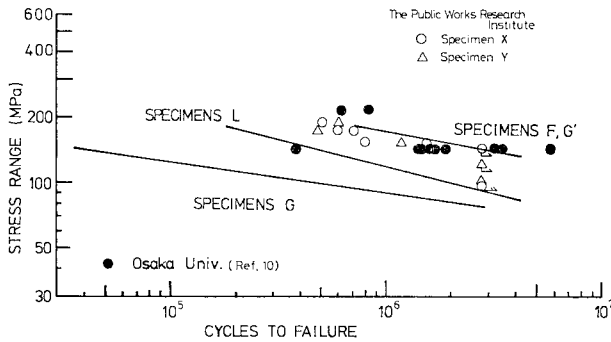


Fig. 13 Comparison of the present fatigue test data with the other bending fatigue test result.

の比較を Fig. 13 に示す。実線は本研究の各タイプの試験体の 50% 破壊確率線を示す。大阪大学の試験体は、ルート間隔が 4mm、開先角度 50° で、溶接順序は、トラフリブ側面第 1 層、底面第 1 層、底面第 2 層、側面第 2 層の順序で行われた。土木研究所の値は、試験体のルート間隔が 6mm、開先角度 35° の試験結果である。溶接順序は、本研究での試験体 F, G, G' の場合と同様に底面から始められた。試験体 X は、トラフリブ曲げ加工部の裏当て金の肌すきが 1~2mm で、試験体 Y は肌すきが 3~5mm である。本研究での不溶着部の生じていないと思われる試験体 F, G' の結果とほぼ一致している。大阪大学の試験体は、放射線透過によると 1 体が 4 級で、その他の試験体はすべて 1 級もしくは 2 級である。

(4) 溶接残留応力の影響

トラフリブ底面ルート部に発生した疲れ亀裂は、細長い半楕円亀裂となり、板厚方向に貫通し、リブ底面全体に広がる。Fig. 14 にトラフリブ表面で測定した疲れ亀裂の進展状況と残留応力との関連を示す。疲れ亀裂長を横軸に、載荷繰返し回数を縦軸にとり、残留応力の測定結果と破断

面のスケッチを合わせて示す。亀裂長さが縦軸と平行に立ち上がっている部分では、疲れ亀裂が進展していないことを示し、勾配が緩い部分では亀裂進展が速いことを示す。疲れ亀裂は不溶着部付近で発生し、進展してゆくが、圧縮残留応力の大きな曲げ加工部で亀裂進展が遅くなりついには停止することがわかる。溶接順序にかかわらず、トラフリブ曲げ加工部には、大きな圧縮残留応力が生じていることから、トラフリブ底面の圧縮残留応力の有無が疲労強度に及ぼす影響を調べるために、疲れ亀裂を目視により発見したときの繰返し回数 N_c^* と作用応力範囲 σ_r の関係を Fig. 15 に示す。 N_c^* のプロットの右下の () 内の数字は、目視により発見した疲れ亀裂の長さを示す。数字の記入されていないデータは、目視によって疲れ亀裂を発見したとき、疲れ亀裂の長さを測定しなかったことを表わす。疲れ亀裂の長さには、ばらつきがみられるが、ここではほぼ同じ条件とみなした。これは、疲れ亀裂がトラフリブ底面に

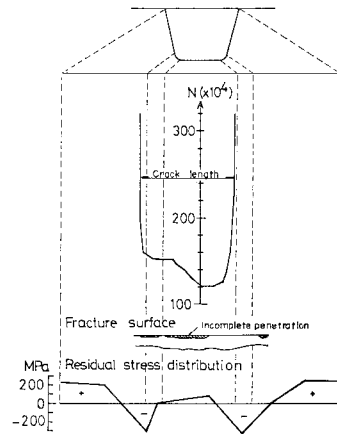


Fig. 14 Crack propagation with residual stress distribution and sketch of fatigue fracture surface.

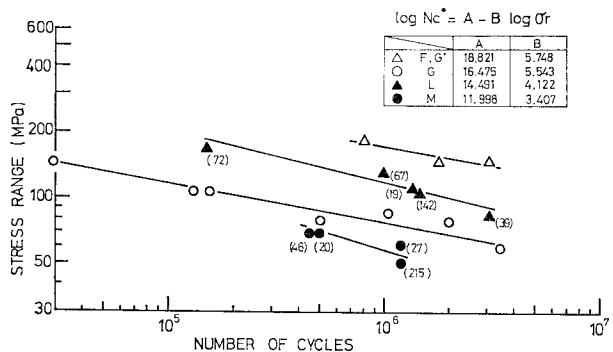


Fig. 15 Bending fatigue test result (S- N_c^* diagram).

発見されてから曲げ加工部に至るまでの繰返し回数は少なく、疲労寿命に対する割合が小さいためである。Fig. 14 に示した例では、疲れ亀裂の長さが A-A から H-F に至るまでの繰返し回数は25万回であり、疲労寿命に対する割合は約8%である。試験体Fの N_c^* は観測されていないが

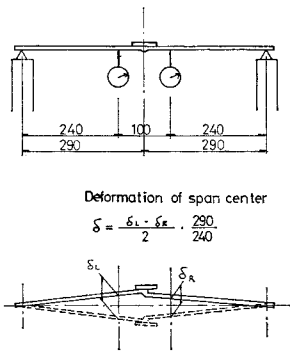


Fig. 16 Measurement of initial bending.

応力範囲 σ_r が大きく、同程度の応力範囲 σ_r の試験結果を参考にして $N_c^* = N_f$ とみなした。S- N_c^* 線図を、 $\log N_c^* = A - B \log \sigma_r$ の形に整理し、200万回疲労強度と比較すると、不溶着部の有無にかかわらず、およそ100MPaの圧縮残留応力は約50%の強度上昇をもたらす。S- N_c^* 線の傾き $K=1/B$ は、圧縮残留応力の生じていない試験体L, Mでは0.25および0.29であり、圧縮残留応力が存在する試験体FG', Gでは0.17および0.18である。このように、圧縮残留応力の存在は傾きKを緩くすることがわかる。

4. 現行基準による疲労強度の照査

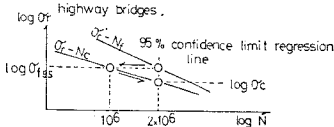
裏当金を用いた鋼床版トラフリブの現場溶接継手の疲労許容応力度は、日本鋼構造協会(JSSC)疲労設計指針¹³⁾の考え方にに基づき、200万回程度の繰返し回数に対する疲れ亀裂発生強度を基準として定められている。

Table 3の挿入図に示すように、疲労破断に対する σ_r-N_f 線図(95%信頼限界線図)を求め、その200万回強度 σ_{f95} が疲れ亀裂発生に対する σ_r-N_c 線図の100万回強度と等しいと仮定し、その傾きを $K=0.18$ とし

Table 3 Comparison of fatigue test result with the allowable stresses in fatigue design codes.

Specimens	(MPa)						
	σ_{f50}	σ_{f95}	σ_{c1}	σ_{c50}	σ_{c95}	σ_{c2}	$\sigma_{c2/G}$
F, G'	151	131	116	151	131	116	1.48
G	81	76	67	68	56	49	0.63
H	108	92	81	103	87	77	0.98
L	99	82	72	97	81	71	0.91
M	-	-	-	47	39	34	0.43

$\sigma_{f50}, \sigma_{c50}$: the average strength at 2×10^6 cycles,
 $\sigma_{f95}, \sigma_{c95}$: the 95% confidence limit for the fatigue strength,
 σ_a : 78.4 MPa (8 kg/mm²), the allowable stress range according to the standard specification for highway bridges.



て疲れ亀裂発生に対する疲労強度 σ_c を与えている。道路橋示方書¹⁴⁾では、T荷重1台による最大応力度で疲労の照査を行い、疲労許容応力度は78.4MPa(8kg/mm²)と規定している。本州四国連絡橋公団の鋼床版設計要領¹⁵⁾では、許容応力度振幅として88.2MPa(9kg/mm²)を与えている。

この許容値と実験結果の比較をTable 3に示す。 $\sigma_{f50}, \sigma_{c50}^*$ は200万回50%破壊確率疲労強度で、 σ_{c50}^* はトラフリブに疲れ亀裂を目視により発見したときの値を示す。 $\sigma_{f95}, \sigma_{c95}^*$ は95%信頼限界における200万回疲労強度を表わし、 σ_{c1} は、JSSCの疲労設計指針に基づき σ_{f95} を用いて求めた200万回疲れ亀裂発生強度を表わす。 σ_{c2} は、 σ_{f95}^* を用いて求めた200万回疲れ亀裂発生強度を表わす。95%信頼限界破壊強度 σ_{f95} に着目すると、トラフリブで底面に圧縮残留応力があり不溶着部が存在する試験体Gにおいては、実験値が許容応力度78.4MPa(道路橋示方書)を下回る。また、リブ底面に引張残留応力が生じている試験体Mでは、疲労破断したデータが少なく σ_{f95} が求められないが、Fig. 12に示した実験結果によると、疲労強度はさらに低下すると思われる。残留応力測定結果によると、トラフリブの曲げ加工部には大きな圧縮残留応力が生じており、この圧縮残留応力が疲れ亀裂を停留させていた。しかし、実橋の鋼床版には剛な主桁や縦桁があり、トラフリブが連続してつながっているため、溶接時の変形拘束が大きく、その結果、リブ曲げ加工部の圧縮残留応力が試験体の場合より小さくなる可能性がある。圧縮残留応力が小さくなると疲れ亀裂進展は速くなり、リブ底面に疲れ亀裂が発見された時点が、近似的に疲労破壊と考えられる。このため、疲れ亀裂を目視により発見したときの95%信頼限界疲労強度 σ_{c95}^* を求め、さらにJSSC疲労設計指針の手法に従って200万回疲れ亀裂発生強度 σ_{c2} を算出した。この結果によると、ルート間隔が十分にあり、しかもリブ底面に圧縮残留応力が生じている試験体FG'だけが許容応力度を満足し、他の試験体ではすべて許容応力度を満たさない。リブ底面に引張残留応力があって、不溶着部のない試験体Lの場合には、疲れ亀裂発生強度は許容値の約90%であり、さらに引張残留応力と不溶着部が存在する場合には、許容値の約43%となる。

5. まとめ

本研究は、鋼床版閉断面縦リブの現場溶接継手形式の疲労に対する安全性を確認するために、モデル引張疲れ試験および実物大曲げ疲れ試験を行った。結論を要約すると次のようになる。

(1) 引張疲れ試験結果によると、約 1 mm の目違いを設けて上向き溶接を行った試験体 D の疲労強度が最も低い。

(2) 放射線透過試験および疲労破面観察から、溶接内部欠陥が疲労強度に及ぼす影響は小さい。これは疲れ亀裂が、溶接止端部および溶接ルート部から発生していることと対応する。

(3) トラフリブ突合せ溶接部のリブ方向の残留応力分布は、溶接順序に大きく左右される。トラフリブ底面を先に溶接した場合、リブ底面には約 100 MPa の圧縮残留応力が生じ、リブ側面を先に溶接した場合には、リブ底面に約 50 MPa の引張残留応力が生ずる。また、曲げ加工部には溶接順序にかかわらず、大きな圧縮残留応力が生じている。

(4) ルート間隔を 0 mm とすると不溶着部を生じ、200 万回疲労強度は、不溶着部がない場合に比べて約 45% 低下した (試験体 FG' と試験体 G)。

(5) 圧縮残留応力は疲労強度を向上させる効果をもつ。リブ底部に約 100 MPa の圧縮残留応力が存在すると、200 万回疲労強度は約 50% 上昇する (試験体 FG' と試験体 L)。

(6) 現行設計基準等による疲労強度の照査を行うと、許容応力度を満足するのは試験体 FG' だけである。このことは、裏当金を用いた鋼床版トラフリブの現場溶接継手の施工は、十分なルート間隔を得ることが必要である。言い換えれば、綿密な施工管理と溶接工の訓練を十分行って、不溶着部を生じないような溶接を行わないと許容応力度を満足する溶接継手とならない。

謝辞：本研究は、昭和 55 年度から 3 年間にわたり継続されたもので、その間名古屋大学土木工学科の秋里及武宏 (現・大成建設)、後藤信弘 (現・新日本製鉄)、佐々木章文 (名大大学院)、近藤俊行 (現・石川島播磨重工業)、川瀬智彦 (名大大学院)、名城大学土木工学科の有田仁一 (現・明倫館)、藤井早人 (現・スギヤマ工業) の諸君には実験と解析に協力いただいた。また、宮川健策、津沢 稔、篠原義則、藤枝幸一氏 (トピー工業) に

は、共同研究として試験体の製作と実験を分担していただいた。ここに記して感謝の意を表します。なお、実験の一部は名古屋高速道路公社の受託研究として行われたことを付記する。

参考文献

- 1) Klöppel, K. und E. Roos : Statische Versuche und Dauerversuche zur Frage der Bemessung von Flachblechen in Orthotropen Platten, Der Stahlbau, Vol. 29, 12, 1960.
- 2) Hänsche, H. und G. Müller : Dauerfestigkeitsversuche an Geschweißten Hohlrippenanschlüssen, Der Stahlbau, Vol. 31, 3, 1962.
- 3) Kunert, K. : Einige Überlegungen zur Projektierung von Stahlbrücken am Beispiel der Mainbrücke Hochheim, Der Bauingenier, Vol. 42, 9, 1967.
- 4) Erzurumlu, H. and A. Toprac : Fatigue of Orthotropic Steel Decks, ASCE, Vol. 98, 4, 1972.
- 5) 国広哲男・井上啓一 : 道路橋の疲労設計, 道路, 3, 1972.
- 6) 国広哲男・藤原 稔・武田亘弘 : 鋼床版隅肉溶接部の疲労試験結果, 土木技術資料, 16-2, 1974.
- 7) 国広哲男・藤原 稔 : 鋼床版の疲労強度, 道路, 5, 1974.
- 8) 小西一郎・西村 昭・山川純雄・近藤和夫・加藤隆夫 : 橋梁鋼床版現場溶接部の耐疲労性—新十三大橋の場合—, 土木学会誌, 8, 1969.
- 9) 佐伯彰一・西川和広・滝沢 晃・新田篤志 : 鋼床版縦リブ現場溶接継手の施工条件と疲労強度, 土木技術資料, 23-8, 1981.
- 10) 堀川浩甫・李 東郁・石崎 浩 : 閉断面縦リブを有する鋼床版現場溶接部の疲労強度に関する研究, 土木学会第 37 回年次学術講演会概要集, 第 1 部, 1982.
- 11) 小林正紀・西脇威夫・鈴木康弘 : 鋼床版閉断面縦リブ裏当金付突合せ溶接継手の疲労に関する一考察, 土木学会第 36 回年次学術講演会概要集, 第一部, 1981.
- 12) Maeda, Y. and M. Sera : Fatigue Characteristics of Steel Plate Decks for Steel Bridges, Fatigue of Steel and Concrete Structures, Proc. of IABSE Colloquium, Lausanne, 1982.
- 13) 日本鋼構造委員会 : 日本鋼構造協会疲労設計指針・同解説 (案), JSSC, Vol. 10, No. 101, 5, 1974.
- 14) 日本道路協会 : 道路橋設計示方書・同解説 II 鋼橋編, 2, 1980.
- 15) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会 : 鋼床版設計要領 (案), 3, 1978.
- 16) 佐伯彰一・西川和広・滝沢 晃 : 鋼床版 U リブ現場溶接継手の疲労試験, 土木技術資料, 25-3, 1983.

(1983.3.29・受付)